

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 395 692**

51 Int. Cl.:

G21C 7/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.01.2009 E 09000183 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.10.2012 EP 2088601**

54 Título: **Conjunto de barras grises de control avanzado**

30 Prioridad:

08.02.2008 US 28119

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

14.02.2013

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(100.0%)**

**4350 NORTHERN PIKE
MONROEVILLE, PA 15146-2866, US**

72 Inventor/es:

**DRUDY, KEITH J.;
CARLSON, WILLIAM R.;
CONNOR, MICHAEL E.;
GOLDENFIELD, MARK;
HONE, MICHAEL J.;
LONG, CARROLL J.;
PARKINSON, JEROD y
POMIRLEANU, RADU O.**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 395 692 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Conjunto de barras grises de control avanzado

Antecedentes de la invención**Campo de la invención**

- 5 La invención se refiere, en general, a reactores nucleares y, más en particular, a un diseño de conjuntos de barras grises de control avanzado (GRCA).

Información Sobre Antecedentes

10 La potencia producida por el reactor de una central de energía nuclear se controla generalmente elevando o descendiendo unos conjuntos de barras de control dentro del núcleo del reactor, y el cambio en la potencia de salida del reactor, requerido para responder a un cambio en la demanda de potencia de salida de la central de energía eléctrica, se denomina comúnmente seguimiento de carga. Tal como se describe, por ejemplo, en la Patente Estadounidense N° 4.079.236, el seguimiento de carga presenta muchos problemas operativos. Por ejemplo, en un reactor de agua a presión (PWR), durante el seguimiento de carga, debe controlarse la reactividad y deben abordarse los cambios en la distribución axial de potencia en el núcleo en respuesta al cambio del nivel de potencia.

15 Los conjuntos de combustible de los núcleos de reactor modernos emplean típicamente dos tipos de conjuntos de barras de control para controlar la reactividad, los conjuntos de haz de barras de control (RCCAs) y los conjuntos de barras grises de control (GRCA). Ambos consisten en una pluralidad de barras absorbentes de neutrones sujetas por sus extremos superiores a un buje común o conjunto de araña. El cuerpo de las barras generalmente comprende un tubo de acero inoxidable que encapsula un material absorbente de neutrones, tal como un material de plata-indio-cadmio absorbente, y se deslizan las barras dentro de unos manguitos guía tubulares del conjunto de combustible mediante un mecanismo de accionamiento de control, situado cerca de la parte superior del conjunto de araña, que opera para controlar el movimiento de las barras dentro de los manguitos guía. De esta manera, la inserción y extracción controladas de las barras controlan generalmente la cantidad de potencia producida por el reactor. Adicionalmente, se utilizan los GRCA durante la operación a plena potencia tal como se describirá a continuación.

20 Típicamente, se utilizan los GRCA en la maniobra de seguimiento de carga debido a que están compuestos por barras de control de valor reducido, comúnmente denominadas barras "grises" en la técnica, y que tienen un menor impacto sobre la distribución del núcleo. El término "gris" tal como se utiliza en el presente documento se refiere a la característica de absorción de neutrones, y se refiere al hecho de que el GRCA está ideado para absorber únicamente una fracción de los neutrones de energía térmica y epitérmica que entran en el material absorbente, en contraposición a las barras "negras" de control, que están ideadas para absorber una gran mayoría de neutrones para parar el reactor. Las barras grises son conocidas por proporcionar un mecanismo de control de la reactividad por ajuste mecánico (MSHIM), en contraposición a un ajuste químico que requiere cambiar la concentración de boro soluble en el refrigerante del reactor. Por lo tanto, el uso de barras grises minimiza la necesidad de procesar el refrigerante primario del reactor a diario y, por lo tanto, simplifica en gran medida las operaciones. Esta función de control de la reactividad se utiliza tanto en las operaciones a plena potencia como durante el seguimiento de carga. Más específicamente, un diseño existente de GRCA consiste en 24 varillas sujetas por sus extremos superiores a la araña. De las 24 varillas dentro del haz, sólo cuatro barras son barras absorbentes, y el material absorbente de neutrones encapsulado dentro de las barras absorbentes típicamente consiste en una aleación que contiene un 80% aproximadamente de plata (Ag), un 15% aproximadamente de indio (In), y un 5% aproximadamente de cadmio (Cd). Tal diseño presenta varias desventajas.

25 Entre las desventajas de los diseños conocidos de GRCA de Ag-In-Cd, está el hecho de que el indio y el cadmio tienen una sección eficaz relativamente grande para los neutrones, lo que provoca su agotamiento en un periodo de tiempo relativamente corto. Como resultado, el valor de la barra en tal diseño de GRCA se ve reducido por debajo de un valor aceptable dentro de un plazo de entre cinco y diez años aproximadamente, dependiendo del diseño y la cantidad de uso. El uso continuado más allá de este periodo resulta en un agotamiento adicional, y eventualmente los GRCA dejarán de ser efectivos a la hora de controlar el reactor durante el seguimiento de carga o de proporcionar un control de la reactividad a plena potencia. Esto conduce indeseablemente al frecuente reemplazo del GRCA. Una segunda desventaja se refiere a los cambios en la potencia local de barra para las barras de combustible que están adyacentes a los cuatro manguitos de guía que contienen las barras de combustible. Específicamente, debido a que en los diseños conocidos el material absorbente está localizado en cuatro varillas, se produce un cambio en la potencia relativamente alto, comúnmente denominado incremento de potencia de las barras de combustible, por ejemplo, durante la extracción de barras. La extracción de barras es el proceso de extracción del GRCA del conjunto de combustible. En los diseños conocidos de GRCA, una extracción de barras

puede resultar en un pico del incremento de potencia, en las barras de combustible adyacentes, que puede ser superior a los límites permisibles, lo que indica un aumento del riesgo de un fallo de combustible. Los diseños de GRCA que son variaciones de diseños conocidos, y que incorporan menores cantidades de Ag-In-Cd distribuidas uniformemente entre las 24 varillas, pueden mitigar este problema. Sin embargo, tales diseños también se agotarán a una velocidad significativamente más elevada debido a un menor autoblandaje del indio y el cadmio, y se agotarán completamente por debajo del valor de barra aceptable en menos de cinco años. Adicionalmente, el hinchamiento del absorbente debido a la transmutación inducida por irradiación en los diseños de barras de control de aleación de plata ha sido un problema en la industria durante muchos años. Específicamente, la exposición de la plata y el indio a la radiación de neutrones resulta en la formación de cantidades significativas de cadmio y estaño, lo que puede llevar a un hinchamiento debido a cambios en la densidad del material. Un hinchamiento excesivo del absorbente puede provocar que el absorbente entre en contacto con el encamisado que lo rodea, y potencialmente agrietarlo.

Las barras grises de valor reducido típicamente están ideadas para tener un valor de reactividad menor que el de las barras de control RCCA estándares (o negras) que se utilizan para parar el reactor o para proporcionar una capacidad bruta de control de la reactividad. El valor diana de la reactividad de una barra gris de control puede variar dependiendo de la aplicación y de la estrategia operativa pretendida para la planta. Adicionalmente, el peso de una barra gris de control deberá ser similar al peso de una barra negra de control utilizada en la misma planta, si tanto la barra gris de control como la negra tienen las mismas interfaces con otros componentes del reactor. El valor de reactividad y el peso de una barra gris de control pueden determinarse mediante el/los material/es seleccionado/s y la configuración final de la barra. Típicamente, el uso de un único material absorbente no satisface ambos requisitos de peso y valor de reactividad. Por lo tanto, existe espacio para la mejora en los diseños de GRCA para reactores nucleares.

En la técnica anterior se conocen diversos conjuntos de barras grises.

El documento JP-05142376 A da a conocer una barra gris para un conjunto de haz de barras de control ideada para su utilización como elemento simulado. Comprende un tubo de encamisado alargado que contiene pastillas de tungsteno y pastillas de acero inoxidable alternadas y formadas con una forma cilíndrica de aproximadamente el mismo diámetro que el diámetro interior del tubo de encamisado, estando mezcladas las pastillas de los dos metales, según una relación específica, a modo de sustancia de peso de sustitución con el mismo peso y el mismo volumen que un material absorbente de neutrones.

El documento WO 2007/014260 A2 da a conocer un conjunto de barras grises de control para un reactor nuclear que comprende unas barras grises, cada una de las mismas con un tubo de encamisado alargado, un tubo de soporte dispuesto dentro de dicho tubo de encamisado, y un absorbente encapsulado por el tubo de soporte. El tubo de soporte está fabricado con acero inoxidable y el material absorbente de neutrones es sustancialmente plata pura.

El documento EP-0 408 172 A1 da a conocer una barra de control híbrida para un reactor nuclear que tiene, en una realización, una combinación de pastillas absorbentes de neutrones débiles y fuertes en un encamisado de acero inoxidable, en la cual las correspondientes pastillas pueden tener diferentes alturas y, en otra realización, pastillas apiladas que comprenden cada una de las mismas una porción de anillo exterior de acero inoxidable o Inconel y una porción de núcleo de un material absorbente fuerte tal como hafnio.

Sumario de la invención

Éstas y otras necesidades se ven satisfechas por la presente invención, que está dirigida a un diseño de un conjunto de barras grises de control avanzado (GRCA) que proporciona un material absorbente de neutrones mejorado, un conjunto de barras grises mejorado y una distribución de conjuntos de barras grises que está adaptado para responder a operaciones de seguimiento de carga y para superar las conocidas condiciones adversas tradicionalmente asociadas a las mismas.

Un aspecto de la invención es una barra gris para un conjunto de barras de control de un reactor nuclear, comprendiendo dicha barra gris un elemento tubular alargado con un primer extremo, un segundo extremo, un diámetro exterior y una longitud; un absorbente de neutrones dispuesto dentro de dicho elemento tubular alargado, generalmente hacia el primer extremo del mismo, comprendiendo dicho absorbente de neutrones un material absorbente con una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios.

Otro aspecto de la invención es un conjunto de barras grises de control avanzado para un reactor nuclear, comprendiendo dicho conjunto de barras grises de control avanzado una pluralidad de barras grises en la cual cada una de dichas barras grises comprende un elemento tubular alargado con un primer extremo, un segundo extremo, un diámetro exterior y una longitud, un absorbente de neutrones dispuesto dentro de dicho elemento tubular alargado, generalmente hacia el primer extremo del mismo, comprendiendo dicho absorbente de neutrones un

material absorbente con una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios.

5 El absorbente de neutrones puede estar distribuido entre todos los conjuntos de barras grises de la pluralidad de conjuntos de barras grises. Más específicamente, el conjunto avanzado de barras grises de control puede incluir 24 barras grises en las cuales el absorbente de neutrones está distribuido generalmente por igual entre todas las 24 barras grises del conjunto.

10 Otro aspecto más de la invención es un reactor nuclear con un conjunto de barras grises de control para reactor nuclear, comprendiendo dicho conjunto de barras grises de control una pluralidad de barras grises en la cual cada una de dichas barras grises comprende un elemento tubular alargado con un primer extremo, un segundo extremo, un diámetro exterior y una longitud, un absorbente de neutrones dispuesto dentro de dicho elemento tubular alargado, generalmente hacia el primer extremo del mismo, comprendiendo dicho absorbente de neutrones un material absorbente con una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios.

Breve descripción de los dibujos

15 Puede obtenerse una comprensión completa de la invención a partir de la siguiente descripción de las realizaciones preferidas, leída en conjunto con los dibujos adjuntos en los cuales:

La Figura 1 es una vista en alzado de un conjunto de combustible, ilustrado en forma verticalmente acortada, y de un conjunto de control del mismo, mostrado parcialmente en dibujo con líneas de trazos;

20 La Figura 2A es una vista en alzado parcialmente seccionada del conjunto de control de la Figura 1, que ha sido retirado del conjunto de combustible;

La Figura 2B es una vista en planta del conjunto de araña de barras de control para el conjunto de control de la Figura 2A;

La Figura 3 es un gráfico que traza, por comparación, las tasas de agotamiento de diversos materiales absorbentes de neutrones en un diseño de GRCA que utiliza una aleación de Ag-In-Cd como absorbente;

25 La Figura 4 es un gráfico que traza, por comparación, el valor de reactividad relativo de un GRCA con absorbente de tungsteno de acuerdo con la presente invención comparado con el valor de reactividad relativo de un diseño de GRCA con absorbente de Ag-In-Cd;

La Figura 5 es una vista en alzado, parcialmente seccionada, de un conjunto avanzado de barras grises de acuerdo con la invención;

30 La Figura 6 es una vista en sección transversal tomada por la línea 6-6 de la Figura 5;

La Figura 7 es un diagrama esquemático de un octavo de un conjunto de combustible, que muestra el cambio en la potencia de la barra tras retirar del núcleo el GRCA de la técnica anterior durante una extracción de barras; y

35 La Figura 8 es un diagrama esquemático de un octavo de un conjunto de combustible, que muestra el cambio en la potencia de la barra del conjunto de combustible que emplea el GRCA avanzado de la presente invención, mostrado tras retirar del núcleo el GRCA.

Descripción de las realizaciones preferidas

40 Por simplicidad de divulgación, se describirá la invención con referencia al diseño de núcleo de reactor de agua a presión (PWR) comercializado bajo la designación AP1000. El AP1000 es un diseño de reactor de Westinghouse Electric Company LLC. Westinghouse Electric Company LLC tiene su sede en Monroeville, Pennsylvania. La referencia al AP1000 únicamente se proporciona con propósitos de ejemplo ilustrativo y no resulta limitante para el alcance de la invención. Por lo tanto, podrá apreciarse que el diseño de GRCA ejemplar de la invención tiene aplicación en una amplia variedad de otros diseños de reactores.

45 Las frases direccionales utilizadas en el presente documento, tales como, por ejemplo, superior, inferior, arriba, abajo, izquierda, derecha, y derivados de las mismas, se refieren a la orientación de los elementos mostrados en los dibujos y no son limitantes de las reivindicaciones a no ser que se recite expresamente en las mismas.

Tal como se emplea en el presente documento, la afirmación de que dos o más partes están "acopladas" entre sí significará que las partes están unidas entre sí directamente o unidas entre sí a través de una o más partes intermedias.

Tal como se emplea en el presente documento, el término “número” se referirá a uno o más de uno (es decir, una pluralidad).

Conjunto de Combustible

5 A continuación con referencia a los dibujos y en particular a la Figura 1, se muestra una vista en alzado de un conjunto de combustible para reactor nuclear, representado en una forma verticalmente acortada y que está designado generalmente con el número de referencia 10. El conjunto 10 de combustible es del tipo utilizado en un reactor de agua a presión (PWR) y tiene un esqueleto estructural que, en su extremo inferior, incluye una tobera inferior 12 para soportar el conjunto 10 de combustible sobre una placa inferior 14 de soporte de núcleo en la zona del núcleo del reactor nuclear (no representado), una tobera superior 16 en su extremo superior, y un número de tubos o manguitos 18 de guía que se extienden longitudinalmente entre unos extremos opuestos y están rígidamente sujetos por los mismos a las toberas inferior y superior 12 y 16.

15 El conjunto 10 de combustible incluye adicionalmente una pluralidad de rejillas transversales 20 separadas axialmente a lo largo de, y montadas en, los tubos 18 de guía, y una matriz organizada de barras 22 de combustible alargadas transversalmente separadas y soportadas por las rejillas 20. El conjunto 10 también tiene un tubo 24 de instrumentación situado en el centro del mismo y que se extiende entre las toberas inferior y superior 12 y 16 y está montado en las mismas. En vista de la anterior disposición de partes, debe comprenderse que el conjunto 10 de combustible forma una unidad integral que puede manejarse convenientemente sin dañar las partes del conjunto.

20 Tal como se ha mencionado anteriormente, la matriz de barras 22 de combustible del conjunto 10 de combustible están sujetas, en relación separada entre sí, por las rejillas 20 que están separadas a lo largo del conjunto de combustible. Cada barra 22 de combustible incluye unas pastillas 26 de combustible nuclear y está cerrada en sus extremos por unos tapones extremos superior e inferior 28 y 30. Las pastillas 26 están mantenidas en una pila mediante un muelle de empuje 32 dispuesto entre el tapón extremo superior 28 y la parte superior de la pila de pastillas. Las pastillas 26 de combustible, compuestas por un material físil, son responsables de la creación de la energía reactiva del reactor. Un moderador/refrigerante líquido tal como agua o agua conteniendo boro, es bombeado hacia arriba a través de una pluralidad de aberturas de flujo en la placa inferior 14 del núcleo hasta el conjunto de combustible. La tobera inferior 12 del conjunto 10 de combustible pasa el refrigerante hacia arriba a través de los tubos 18 de guía y a lo largo de las barras 22 de combustible del conjunto para extraer el calor generado en el mismo para la producción de trabajo útil. Para controlar el proceso de fisión, un número de barras 34 de control son recíprocamente móviles en los manguitos 18 de guía situados en posiciones predeterminadas en el conjunto 10 de combustible. Un conjunto 39 de araña situado encima de la tobera superior 16 soporta las barras 34 de control.

35 Las Figuras 2A y 2B muestran el conjunto 36 de barras de control una vez que ha sido retirado del conjunto 10 de combustible de la Figura 1. En general, el conjunto 36 de control tiene un elemento cilíndrico 37, con una pluralidad de uñas o brazos 38 extendidos radialmente, que comprende el conjunto 39 de araña que se muestra mejor en la Figura 2B. Tal como se ha mencionado anteriormente, cada brazo 38 está interconectado con las barras 34 de control de manera que el conjunto 36 de barras de control pueda operarse para mover las barras 34 de control verticalmente dentro de los manguitos 18 de guía (Figura 1) para así controlar el proceso de fisión en el conjunto 10 de combustible (Figura 1), todo ello de manera muy conocida. Con la excepción del conjunto de barras de control ejemplar que comprende un conjunto avanzado 36 de barras grises de control (GRCA) con unos conjuntos 34 de barras grises mejorados, que se analizarán a continuación, todo lo anterior es antiguo y generalmente bien conocido en la técnica.

GRCA avanzado

45 Continuando con referencia a las Figuras 2A y 2B, a continuación se describirá la configuración general de barras de control. Tal como se ha mencionado anteriormente, para poder aprovechar las ventajas de las capacidad de MSHIM que permiten las barras grises o de bajo valor, los conjuntos de barras de control conocidos, tales como los conjuntos de control existentes para el reactor AP1000 de Westinghouse Electric Company LLC, emplean GRCA. Sin embargo, aunque el diseño de GRCA para el diseño del reactor AP1000 actual tiene 24 barras que están generalmente configuradas tal como se muestra en la Figura 2B, tal como se ha mencionado anteriormente, 20 de las 24 barras son barras de desplazamiento de agua de acero inoxidable (p. ej., sin limitación, SS-304) y únicamente cuatro de las barras son barras absorbentes de neutrones, para obtener el bajo valor diana de reactividad para el GRCA. Por lo tanto, esencialmente todo el material absorbente de neutrones está localizado y aislado en sólo cuatro localizaciones de barras dentro del GRCA.

55 Adicionalmente, en el diseño existente de AP1000, el material absorbente comprende un absorbente de aleación de Ag-In-Cd que consiste en 80% aproximadamente de plata, 15% aproximadamente de indio, y 5% aproximadamente de cadmio, lo cual absorberá una gran cantidad de los neutrones de energía térmica y epitérmica que entren en la zona del absorbente. Tal absorbente de neutrones es conocido en la técnica como absorbente “negro”. Este

material absorbente es consistente con los conjuntos estándar conocidos de haces de barras de control (RCCAs) de fuerza total, en los cuales las 24 barras son de Ag-In-Cd. Tal como se ha observado, y tal como se analizará en el presente documento con referencia a la Figura 3, el indio y el cadmio son conocidos por su rápido agotamiento. Los RCCAs pasan una mínima cantidad de tiempo en el núcleo durante la operación a potencia. Por lo tanto, dicho agotamiento no es un problema. Sin embargo, para la operación con juste mecánico de la reactividad (MSHIM) del AP1000, por ejemplo, los GRCA deberán residir en el núcleo durante la mitad del ciclo operativo. Bajo estas condiciones operativas, el diseño existente de GRCA debería ser reemplazado cada cinco a diez años aproximadamente debido al rápido agotamiento del absorbente. Tal como se analizará en detalle a continuación, entre otras ventajas, el diseño avanzado de GRCA de la invención supera esta desventaja de rápido agotamiento y también evita sustancialmente el pico de potencia local no deseable que se experimenta cuando se extrae del núcleo un GRCA tradicional con cuatro barras RCCA.

Con referencia a la Figura 3, se obtendrá una comprensión adicional del problema de agotamiento del absorbente anteriormente mencionado. La Figura 3 muestra un gráfico de las tasas de agotamiento de dos isótopos diferentes de plata, dos isótopos diferentes de indio, y la tasa de agotamiento del cadmio. Más específicamente, los agotamientos de la plata-107 (Ag-107), la plata-109 (Ag-109), el indio-113 (In-113), el indio-115 (In-115), y el cadmio (Cd) están trazados juntos, por comparación, como líneas 100, 102, 104, 106, y 108, respectivamente, para un diseño de GRCA en el cual el autoblandaje está minimizado. Tal como se muestra, ambos isótopos de plata 100, 102 tienen unas tasas de agotamiento relativamente lentas, mientras que el indio-115, 106 y el cadmio 108 tienen tasas de agotamiento rápidas. Específicamente, en este diseño el rápido agotamiento del indio-115, 106 y del cadmio 108 resulta en una pérdida de la fuerza de absorción de un 20% aproximadamente tras sólo cinco años de operación. Los cambios en las características operativas de seguimiento de carga pueden convertirse en un problema en el AP1000 de Westinghouse con tan sólo un 5% de pérdida de la fuerza de absorción del GRCA. Si se aumenta el valor inicial de las barras del diseño de GRCA para compensar el agotamiento anticipado y alargar el tiempo de vida útil del GRCA, el efecto en la distribución de potencia del núcleo debido a una extracción de barras aumentará correspondientemente, lo que llevará a un mayor riesgo de fallos del combustible. Tal como se ha observado anteriormente, el rápido agotamiento de los isótopos del absorbente negro de neutrones resulta indeseablemente en una menor capacidad de los GRCA para controlar el reactor durante un seguimiento de carga. La invención supera estas desventajas empleando un diseño de conjunto de barras grises mejorado que, entre otros refinamientos, emplea un diferente material absorbente de neutrones que tiene un agotamiento mejorado en comparación con el absorbente de Ag-In-Cd existente.

Específicamente, la Figura 4 muestra una gráfica del valor de barra relativo de un GRCA que incorpora el material absorbente 110 ejemplar de la invención en comparación con un GRCA de igual valor inicial que incorpora el absorbente 112 de Ag-In-Cd existente. Ambos diseños representados en la Figura 4 incorporan una distribución uniforme del absorbente en todas las varillas del GRCA para minimizar los impactos de distribución de potencia. Al igual que el gráfico de la Figura 3, el cambio en el valor de las barras está representado mediante el valor relativo frente a la vida útil del absorbente 110, 112, en años. Es deseable que el absorbente 110 utilizado en un GRCA tenga una curva de valor de agotamiento de variación lenta o esencialmente plana ante una exposición a largo plazo a la irradiación de neutrones. Tal operación es típica en un GRCA, en comparación con un RCCA negro estándar que no opera normalmente dentro del núcleo durante la operación a potencia, y por lo tanto no experimenta tanta irradiación de neutrones. Específicamente, la presente invención reemplaza el absorbente 112 de Ag-In-Cd con un absorbente 110 que comprende un material absorbente con una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios. A la hora de seleccionar el material absorbente para un GRCA, también pueden considerarse la capacidad de absorción relativa en los rangos de energía de los neutrones epitérmicos y rápidos, así como las características de la sección eficaz de absorción. El material absorbente 110 puede estar dispuesto en una forma geométrica cilíndrica dentro de la varilla de GRCA. Adicionalmente, el absorbente 110 puede estar segmentado axialmente, o puede ser una pieza maciza que cubra toda la longitud axial del cilindro. Algunos ejemplos no limitantes de materiales absorbentes adecuados pueden incluir, pero sin estar limitados a, tungsteno sustancialmente puro de densidad teórica o cercana a la misma; metal de tungsteno de densidad reducida o poroso; aleaciones con base de tungsteno tales como tungsteno-renio y tungsteno-níquel-hierro; compuestos con base de tungsteno tales como carburo de tungsteno; escandio, iterbio y manganeso sustancialmente puros; aleaciones con base de escandio, iterbio y manganeso, y compuestos con base de escandio, iterbio y manganeso. Tal como se utilizan en el presente documento, las frases "sustancialmente puro" y "puro" se utilizan intercambiamente para referirse a un absorbente que está compuesto casi enteramente por el elemento (p. ej., tungsteno, escandio, iterbio o manganeso), en el cual cualquier impureza que esté presente en el absorbente está en una cantidad tan baja que puede ser generalmente despreciable. La gráfica de comportamiento del valor relativo de las barras mostrada en la Figura 4 para el absorbente 110 ejemplar es para un GRCA basado en un absorbente de neutrones primario que utiliza tungsteno puro.

El uso del material absorbente 110 de la presente invención, p. ej., tungsteno, en vez de un material absorbente alternativo tal como, por ejemplo, plata, plata-indio-cadmio, boro, hafnio y similares, produce al menos uno de los siguientes beneficios. La sección eficaz de captura relativamente baja del tungsteno produce un bajo agotamiento

del absorbente con respecto a otros absorbentes negros. El valor de las barras de un diseño 110 de GRCA con base de tungsteno permanece relativamente estable con una ligera tendencia al aumento que tiene lugar inicialmente, tal como se muestra en la Figura 4, debido a la creación de renio-187. El renio-187 se crea como resultado de la absorción de neutrones en el tungsteno-186 y el consiguiente decaimiento beta del tungsteno-187.

5 La sección eficaz de absorción de neutrones del renio-187 es mayor que la del isótopo padre, y compensa casi por igual el lento agotamiento de todos los isótopos absorbentes inicialmente presentes en el tungsteno, no impacta negativamente en la absorción de neutrones y por lo tanto en la utilidad del GRCA. Se calcula que el absorbente de tungsteno aumentará entre un 3% y un 5% aproximadamente a lo largo de un historial de irradiación en el núcleo de 20 años, tras lo cual el valor comenzará a descender lentamente. También puede esperarse de otros absorbentes potenciales con base de escandio, iterbio o manganeso que presenten en un GRCA unas características de valor de agotamiento relativamente planas debido a la baja sección eficaz de captura de neutrones. Sin embargo, no se conoce que estos materiales se transmuten a ningún isótopo absorbente fuerte de neutrones, y por lo tanto probablemente mostrarán un descenso monótono del valor de barra frente al tiempo. Con el absorbente de tungsteno, pueden minimizarse las reacciones de transmutación que producen cambios significativos en las propiedades del material a lo largo de la vida útil de diseño de la barra gris. La irradiación de neutrones en el tungsteno a largo plazo producirá una aleación de tungsteno-renio que tiene una sección eficaz de neutrones y unas propiedades de material casi iguales que el material original. La curva plana del valor de agotamiento del tungsteno permite que el diseño inicial de la barra gris iguale un valor de barra diana ideal, sin tener que sobrediseñar el valor de barra para compensar los efectos de agotamiento del absorbente, que puede ser tan elevado como un 20% o más con un material absorbente negro. Una barra gris que esté diseñada para el valor de barra diana ideal y no esté sobrediseñada en un 20% o más, puede resultar en un menor riesgo de causar fallos de combustible en el reactor relacionados con una interacción entre las pastillas y el encamisado (debido a un menor incremento de la potencia en las barras de combustible), y por lo tanto una menor radioactividad en el refrigerante del reactor. El tungsteno no se hinchará igual que los absorbentes de Ag-In-Cd, eliminando de esta manera los problemas de agrietamiento del encamisado asociados a los diseños de Ag-In-Cd. Adicionalmente, el tungsteno tiene un punto de fusión significativamente más elevado que el de la plata-indio-cadmio (3422,22° C y 800° C, respectivamente), lo que puede resultar en una supervivencia a los accidentes mejorada. Como resultado, se cree que el absorbente de tungsteno, bajo las condiciones operativas del reactor, se deformará menos que, por ejemplo, un absorbente de plata o de aleación de plata. Adicionalmente, se cree que la activación del tungsteno en el reactor puede producir un factor de fuente radioactiva significativamente menor que con la plata.

En una realización de la presente invención, en la cual el material absorbente incluye tungsteno sustancialmente puro de densidad teórica o cercana a la misma; aleaciones con base de tungsteno tales como tungsteno-renio y tungsteno-níquel-hierro; compuestos con base de tungsteno tales como carburo de tungsteno; escandio, iterbio y manganeso sustancialmente puros; aleaciones con base de escandio, iterbio y manganeso, y compuestos con base de escandio, iterbio y manganeso, el absorbente 110 tiene una densidad de material de 16,5 a 19,4 g/cm³. En una realización, en la cual el absorbente de neutrones es para la aplicación en un AP1000, se utiliza un material absorbente, tal como tungsteno sustancialmente puro, con una densidad de material de 19,3 g/cm³. Adicionalmente, para la aplicación en un AP1000, se utiliza un material con una sección eficaz microscópica de absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios.

40 Tal como se muestra en la Figura 4, el uso del absorbente 110 reduce significativamente la tasa de agotamiento del absorbente, extendiendo la vida útil nuclear del GRCA 36 mejorado (Figura 2A) a más de 20 años. Esto no sólo es una enorme mejora sobre la vida útil anteriormente mencionada de sólo cinco a diez años para el absorbente de Ag-In-Cd existente, sino que el valor del absorbente 110 ejemplar permanece relativamente constante, comparado con el rápido agotamiento del absorbente 112 de Ag-In-Cd. La mayor vida útil del absorbente 110 ejemplar permite al GRCA 36 mejorado (Figura 2A) cumplir con los exigentes requisitos de vida útil para las barras de control.

Las Figuras 5 y 6 muestran el conjunto avanzado 34 de barras grises de control de la invención. Tal como se muestra en la Figura 5, el conjunto 34 de barras grises incluye generalmente un primer extremo 40 que, según su orientación en el núcleo (Figura 1), es el extremo inferior, y un segundo extremo 42 (p. ej., el extremo superior según la perspectiva de la Figura 1). El primer extremo, o extremo inferior 40, tiene un tapón extremo 44 achaflanado. Tal diseño de chaflán facilita la inserción guiada de la barra 34 dentro del tubo 18 de guía (Figura 1) del conjunto 10 de combustible. El segundo extremo, o extremo superior 42, tiene un tapón extremo superior 46 que está estructurado para engancharse al conjunto 39 de araña (mejor mostrado en la Figura 2A), y asegurar el mismo, de manera conocida (p. ej., sin limitación, una disposición de sujeción roscada macho y hembra). Un elemento tubular 48 alargado se extiende entre los tapones extremos superior e inferior 46, 44. El elemento tubular ejemplar es un tubo 48 de acero inoxidable fabricado con acero inoxidable-304, aunque se contemplan los tubos fabricados con otros materiales alternativos conocidos o adecuados tales como, pero sin estar limitados a, zirconio y aleaciones con base de níquel. En el ejemplo mostrado y analizado en el presente documento, el diámetro exterior 50 del tubo 48 es 0,97 centímetros aproximadamente y la longitud total 52 de la barra 34, desde la parte superior del tapón extremo inferior 44 hasta la parte inferior del tapón extremo superior 46, es 444,5 centímetros aproximadamente. Sin embargo, podrá apreciarse que los conceptos de la invención son igualmente aplicables a

barras que tengan cualquier longitud y anchura adecuadas para su uso en una amplia variedad de reactores.

De acuerdo con la presente invención, el absorbente 110 está contenido dentro del elemento tubular alargado 48 y está dimensionado para llenar sustancialmente el diámetro interior del elemento tubular 48. En una realización, el diámetro exterior del absorbente 110 es de 0,381 a 1,016 centímetros; y el diámetro exterior del elemento tubular 48 es de 0,939 a 1,143 centímetros. En otra realización, tal como para el uso con el AP1000, el diámetro exterior del absorbente 110 es de 0,4318 a 0,889 centímetros; y el diámetro exterior del elemento tubular 48 es de 0,9398 a 0,9906 centímetros. El absorbente 110 puede incluir un metal de tungsteno con densidad reducida o poroso; una aleación con base de tungsteno, o un compuesto con base de tungsteno.

Tal como se muestra en la Figura 5, el material absorbente 110 está generalmente dispuesto dentro del elemento tubular alargado 48. Tal como también se muestra en la Figura 5, el absorbente 110 está doblemente encapsulado, primero por un tubo 58 de soporte interior y luego por el elemento tubular alargado 48. El tubo 58 de soporte interior está estructurado como un manguito para rodear y encapsular sustancialmente el absorbente 110, y el elemento tubular alargado 48, es decir, el encamisado, aísla del agua del refrigerante primario al absorbente 110 y al tubo 58 de soporte. El tubo 58 de soporte interior está construido con un metal con unas buenas características de resistencia mecánica y de conductividad térmica en las condiciones operativas esperadas. Adicionalmente, el punto de fusión deberá ser lo suficientemente elevado como para soportar la integridad continuada en el entorno cercano al material absorbente. Materiales adecuados para el tubo 58 de soporte pueden incluir, pero sin estar limitados a, zirconio y aleaciones con base de zirconio; aluminio y aleaciones con base de aluminio; aleaciones con base de níquel tales como Alloy 718 (UNS N07718) y Alloy 625 (UNS N06625); y acero inoxidable tal como SS-304L y SS-316L. El tubo 58 de soporte interior está taponado en ambos extremos para proporcionar el aislamiento del absorbente 110 en caso de rotura del elemento tubular alargado 48. El tubo 58 de soporte también puede facilitar la transferencia de calor fuera del absorbente 110 y proporcionar soporte estructural al absorbente 110.

En una realización de la invención, el tubo 58 de soporte interior puede estar construido a partir de un material absorbente secundario que puede ser seleccionado para aumentar la absorción de neutrones y/o optimizar el peso de las varillas, adicionalmente a facilitar la transferencia de calor y proporcionar soporte estructural. El absorbente secundario puede tener una menor sección eficaz de captura que la del absorbente 110, es decir, el absorbente primario. El absorbente secundario puede tener una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 2 a 6 barnios. Adicionalmente, el absorbente secundario puede tener una densidad de 7 a 9 g/cm³. Ejemplos no limitantes de materiales absorbentes secundarios adecuados pueden incluir, pero no están limitados a, aleaciones de metal con base de níquel tal como Alloy 718 (UNS N07718) y Alloy 625 (UNS N06625); y acero inoxidable tal como SS-304L y SS-316L.

Sin recurrir a ninguna teoría, se cree que la menor sección eficaz microscópica de captura de neutrones del absorbente secundario sirve para contrarrestar la mayor sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones del absorbente primario. De manera similar, la menor densidad del absorbente secundario sirve para contrarrestar la mayor densidad del absorbente primario. Manipulando las proporciones relativas y los materiales seleccionados para los absorbentes primario y secundario, es posible obtener un diseño de GRCA que optimiza simultáneamente tanto el valor como el peso de las barras a valores diana, al tiempo que se mejoran significativamente las características de transferencia de calor. El manguito y/o el encamisado pueden llenarse con un gas inerte tal como, pero sin estar limitado a, helio o argón, para evitar la oxidación del absorbente primario a temperaturas operativas elevadas, y mejorar adicionalmente la transferencia de calor. En el manguito o el encamisado, el absorbente primario puede tener la forma de una pila de cilindros circulares rectos, un único cilindro, o partículas (p. ej., polvo).

El absorbente de neutrones de la presente invención puede estar dispuesto sustancialmente concéntrico dentro del elemento tubular alargado 48. El absorbente de neutrones de la presente invención también puede estar dispuesto sustancialmente concéntrico dentro del tubo 58 de soporte y el tubo de soporte puede estar dentro del elemento tubular 48. El tubo 58 de soporte puede tener un grosor de pared que esté definido sustancialmente por el espacio entre el diámetro exterior del absorbente 110 y el diámetro interior del elemento tubular alargado 48. Tal como se muestra en la sección transversal de la Figura 6, el diámetro 54 del absorbente 110 ejemplar es menor que el diámetro exterior 50 del tubo 48 de barra.

El tubo 58 de soporte tiene un grosor 60 de pared que puede ser mayor que el grosor de la pared del tubo 48. El tubo 58 de soporte puede servir para reemplazar una parte del huelgo diametral entre el absorbente primario y el encamisado exterior con un material de elevada conductividad térmica, facilitando así la transferencia de calor desde el absorbente primario hasta el refrigerante y reduciendo significativamente las temperaturas operativas de la barra gris. El tubo 58 de soporte también puede soportar y encapsular el absorbente primario para reducir la posibilidad de cualquier redistribución del absorbente primario o la posibilidad de liberación del absorbente primario al refrigerante en el caso poco probable de un fallo en el encamisado exterior.

En una realización, el diámetro exterior del absorbente 110 es de 0,254 a 0,9652 centímetros; el diámetro exterior

del elemento tubular 48 es de 0,939 a 1,143 centímetros; y el grosor de la pared del tubo 58 de soporte es de 0,0254 a 0,254 centímetros. En otra realización, tal como para el uso con el AP1000, el diámetro exterior del absorbente 110 es de 0,4064 a 0,6096 centímetros; el diámetro exterior del elemento tubular 48 es de 0,9398 a 0,9906 centímetros; y el grosor de la pared del tubo 58 de soporte es de 0,127 a 0,1778 centímetros.

5 Por consiguiente, los conjuntos 34 de barras grises ejemplares de la invención proporcionan una vida nuclear extendida a través del uso de los materiales absorbentes descritos en la misma. El diseño general 36 de GRCA de la invención también mejora generalmente los márgenes de rendimiento térmico lineal durante las maniobras con las barras. Específicamente, el GRCA ejemplar distribuye el absorbente 110 sobre las 24 barras 34 del conjunto 36 de control en contraposición a la localización del absorbente únicamente en cuatro barras, como en el diseño
10 existente del AP1000 analizado anteriormente. Distribuir el absorbente 110 entre todas las barras 34 del GRCA reduce el cambio de potencia local de las barras de combustible (incremento de potencia) cuando se retira el GRCA 36 del núcleo, lo que a su vez mejora los márgenes operativos. Específicamente, distribuir el material absorbente 110 sobre las 24 barras reduce la cantidad de absorbente 110 en cada barra 34, lo que reduce la magnitud del cambio de reactividad local cerca de cada barra 34 durante una extracción de barras. La cantidad exacta de la
15 reducción en la cantidad del material absorbente 110, en comparación con los absorbentes de Ag-In-Cd del diseño actual, no pretende limitar la invención.

A la vista de lo anterior, los conjuntos 34 de barras grises ejemplares han sido rediseñados para incluir una combinación de características mejoradas tales como un tubo 58 de soporte, un material absorbente completamente diferente que comprende una combinación de un absorbente primario encapsulado por un material
20 absorbente secundario, la cantidad reducida de material de alta absorción de neutrones, y la distribución del absorbente entre todas las barras 34. Por consiguiente, el GRCA 36 de la invención aborda y supera sustancialmente las desventajas anteriormente mencionadas y conocidas en la técnica mediante la reducción de la cantidad de material absorbente 110 de neutrones por cada barra 34, y mediante la distribución sustancialmente uniforme del material absorbente 110 entre todas las barras grises 34 del conjunto 36. Las ventajas del diseño
25 avanzado 36 de GRCA se comprenderán y apreciarán adicionalmente con referencia a las Figuras 7 y 8.

La Figura 7 es una vista esquemática o simplificada de un octavo de un conjunto 10' de combustible convencional que muestra, con fines de comparación con el diseño ejemplar de la Figura 8, el aumento relativamente elevado de la potencia local experimentado por las barras 22' de combustible que rodean el manguito 18', que previamente contenía las barras absorbentes (no representadas en la Figura 7), cuando se extrae el GRCA convencional (no
30 representado) del conjunto 10' de combustible. Los números mostrados en la Figura 7 representan el porcentaje de cambio en la potencia de las barras en respuesta a la extracción del GRCA del conjunto 10' de combustible. Se muestran los efectos adversos del absorbente localizado conocido. Específicamente, tal como se muestra, las barras 22' de combustible adyacentes al manguito 18' que alojaba el absorbente de Ag-In-Cd experimentan un pico aislado o localizado en el cambio de potencia. Tal como se ha mencionado anteriormente, dicho cambio dramático de la potencia resulta indeseable dado que produce un aumento del riesgo de fallos de combustible debidos a interacción entre las pastillas y el encamisado.

La Figura 8 confirma que el diseño 36 de GRCA (Figura 2) de la invención supera estos problemas. Específicamente, comparando la Figura 8 con la Figura 7, se muestra la misma sección de un octavo del conjunto 10 de combustible tras una operación de extracción de barras en la cual el GRCA 36 ejemplar (Figura 2) y las
40 barras grises 34 (Figuras 2, 5 y 6) han sido extraídos del conjunto 10 de combustible. Tal como se muestra, el cambio en la potencia de las barras que rodean los manguitos 18 que alojaban las barras absorbentes (no representadas en la Figura 8) se ve sustancialmente reducido en comparación con los valores del ejemplo de la Figura 7. Específicamente, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 8, el mayor porcentaje de cambio en la potencia de las barras para el GRCA 36 de la invención es del 7% aproximadamente. Esto es una mejora
45 significativa sobre el porcentaje de cambio en la potencia de las barras, un 22% aproximadamente, para el diseño del GRCA convencional representado en la Figura 7. Tal como se ha mencionado anteriormente esta mejora debe atribuirse, en gran medida, a la distribución ejemplar de las barras absorbentes 34 (no representadas en la Figura 8) entre las 24 localizaciones 18 de manguito, en contraposición con un total de sólo cuatro localizaciones 18' de manguito. Por ejemplo, en la porción de un octavo del conjunto 10' de combustible de la Figura 7 sólo se muestra una localización 18' de manguito, mientras que las localizaciones 18 de absorbente se muestran en el diseño
50 ejemplar de la Figura 8. Resumiendo, la combinación del absorbente 110, el tamaño reducido de absorbente por barra 34, el tubo 58 de soporte de absorbente, y la distribución del absorbente 110 a través de todas las barras 34 del GRCA 36 de la invención, resulta en una reducción de la capacidad de absorción de neutrones de cada barra 34 del GRCA 36 aproximadamente de un sexto, lo que reduce por lo tanto el cambio en la potencia local de las barras (incremento de potencia) cuando, por ejemplo, se retira el GRCA 36 del conjunto 10. Podrá apreciarse que las características avanzadas del GRCA 36 de la invención pueden emplearse individualmente o en cualquier combinación conocida o adecuada. Por ejemplo, sin limitación, un material absorbente alternativo, diferente al absorbente 110 ejemplar analizado en el presente documento, podría emplearse en la configuración ejemplar
55 distribuida y de tamaño reducido de la presente invención, sin salirse del alcance de la invención.

La tasa calorífica lineal de las barras absorbentes en un diseño que utilice Ag-In-Cd en un número reducido de barras (4 de 24) puede llevar a la ebullición saturada del agua de refrigeración entre la superficie interior del tubo 18 de guía y la superficie exterior del tubo alargado 48. La distribución del material absorbente 110 en las 24 barras de un conjunto de control minimiza o evita la aparición de una ebullición saturada en los manguitos.

- 5 Por consiguiente, la invención proporciona un GRCA 36 avanzado que, entre otros beneficios, presenta una tasa de agotamiento mejorada, una resistencia a grandes cambios en la distribución de la potencia local durante una extracción de las barras, una resistencia a la ebullición total en los manguitos, y una resistencia mejorada al hinchamiento de la aleación del absorbente y al agrietamiento del encamisado.

Conclusión

- 10 La presente invención se refiere a un diseño mejorado para un conjunto de control de barras grises o de bajo valor (GRCA) para un reactor nuclear. Los GRCA se utilizan en conceptos de reactores nucleares avanzados para proporcionar una fina capacidad de control de la reactividad a través de medios mecánicos, con el propósito de controlar la cantidad de potencia producida por el reactor. Un GRCA típico incluye un conjunto de araña
15 estructurado para proporcionar una inserción o retirada controladas de hasta 24 conjuntos de varillas grises en los manguitos de guía de un conjunto de combustible situado en el núcleo de un reactor nuclear. El diseño mejorado de GRCA de la presente invención incorpora el uso de una pluralidad de conjuntos de varillas grises mejorados, que contienen una combinación y disposición novedosas de materiales absorbentes de neutrones y estructurales. Los conjuntos de varillas grises mejorados se utilizan en todas las localizaciones disponibles dentro del GRCA para lograr el valor de reactividad y el peso de componentes requeridos, al tiempo que se minimiza el impacto sobre la
20 distribución de potencia local en las barras de combustible debido al movimiento del GRCA dentro del conjunto de combustible.

- Cada conjunto de varillas grises mejorado incorpora el uso de un material gris absorbente primario de neutrones soportado por un tubo de soporte interno dentro de un encamisado externo. El absorbente de neutrones primario está compuesto por tungsteno sustancialmente puro, o un material con unas características similares de sección
25 eficaz de absorción de neutrones y de densidad, dispuesto en una forma geométrica cilíndrica. El tungsteno es un material absorbente de neutrones primario preferido para aplicaciones de barras grises de control porque tiene una sección eficaz de absorción de neutrones en el rango diana, y experimenta muy pocos cambios en el valor de la reactividad causados a lo largo del tiempo por los efectos de agotamiento del absorbente ante la exposición prolongada a la irradiación de neutrones. El tungsteno también tiene una densidad de material y una temperatura de
30 fusión muy elevadas, un potencial de activación bajo, y es menos dado al hinchamiento inducido por la irradiación que otros materiales absorbentes negros de neutrones utilizados comúnmente. Las aleaciones o compuestos con base de tungsteno que incorporan otros elementos también pueden considerarse para su uso como el absorbente de neutrones primario en el diseño mejorado. Un elemento tubular alargado, conocido como tubo de soporte interior, soporta y confina el absorbente de neutrones primario. El tubo de soporte interior está compuesto por una
35 aleación de níquel, acero inoxidable, aleación de zirconio, u otro material estructural similar con experiencia en la industria nuclear, que no produzca consecuencias adversas si se ve expuesto al refrigerante del reactor. El tubo de soporte interior pretende principalmente facilitar la transferencia de calor, proporcionar soporte estructural, y evitar la redistribución o el escape del material absorbente de neutrones primario en caso de un fallo en el encamisado externo. Sin embargo, la sección eficaz de absorción de neutrones y la densidad del tubo de soporte interior también pueden utilizarse para optimizar la capacidad total de absorción de neutrones y obtener un peso diana para
40 el conjunto de varillas grises en los casos en que estos parámetros deban controlarse estrechamente. Tanto el tubo de soporte interior como el absorbente de neutrones primario están contenidos dentro de un elemento tubular alargado conocido como el encamisado exterior. El encamisado exterior es típicamente acero inoxidable, pero también puede estar compuesto por una aleación de níquel u otro material estructural similar con experiencia en la
45 industria nuclear, que haya sido utilizado con éxito en aplicaciones que impliquen la exposición prolongada a un refrigerante de reactor. El dimensionamiento y la selección de materiales del absorbente de neutrones primario, el tubo de soporte interior y el encamisado exterior permiten la optimización simultánea del valor de reactividad, el peso total del componente, y las características de transferencia térmica del conjunto mejorado de varillas grises.

- El material absorbente de neutrones primario para uso con la presente invención puede incluir un material con una
50 sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios, dispuesto en una forma geométrica cilíndrica. El material absorbente puede tener una curva del valor de agotamiento de variación lenta o plana ante una exposición prolongada a la irradiación de neutrones, lo cual es una necesidad característica en la operación de un GRCA que puede utilizarse para distinguirlo de un RCCA negro estándar que no experimenta ni con mucho tanta irradiación de neutrones. El absorbente primario puede estar segmentado axialmente, o puede
55 ser una pieza sólida que cubra sustancialmente toda la longitud axial del cilindro. Materiales adecuados para su uso en el absorbente de neutrones primario incluyen:

A.) Tungsteno sustancialmente puro de densidad teórica o cercana a la misma;

B.) Aleaciones que contengan cantidades sustanciales de tungsteno y otros metales, tales como, pero sin estar limitados a, W-Re y W-Ni-Fe;

C.) Compuestos químicos que contengan tungsteno y otros elementos, tales como, pero sin estar limitados a, carburo de tungsteno;

5 D.) Escandio (Sc), iterbio (Yb) y manganeso (Mn) sustancialmente puros; y

E.) Compuestos químicos o aleaciones que contengan Sc, Yb, o Mn.

Estos materiales pueden ser utilizados como absorbente de neutrones primario en realizaciones en las que el absorbente esté contenido dentro de un tubo de soporte interior y un encamisado o en las cuales el absorbente esté contenido únicamente dentro del encamisado sin la presencia de un tubo de soporte. Adicionalmente, cuando no se utiliza un tubo de soporte, el absorbente de neutrones primario también puede incluir un metal de tungsteno de densidad reducida o poroso, es decir, siendo la densidad menor a la densidad teórica.

El uso de los absorbentes con base de tungsteno en aplicaciones de barras grises puede producir al menos uno de los siguientes beneficios:

15 A.) La sección eficaz de captura relativamente baja del tungsteno puede resultar en un bajo agotamiento del absorbente con respecto a otros absorbentes negros, p. ej., Ag-In-Cd, Boro, Hafnio;

B.) La prolongada irradiación de neutrones en el tungsteno tiende a producir una aleación de tungsteno y renio que puede tener una sección eficaz de captura de neutrones casi igual a la del material original, lo que resulta en una curva de valor de agotamiento relativamente plana a lo largo del tiempo;

20 C.) La curva plana del valor de agotamiento puede permitir una optimización del diseño de las barras grises para un valor de barra diana, sin "sobrediseñar" el valor de las barras para compensar los efectos de agotamiento del absorbente, que puede ser tan elevado como un 20% o más en un material absorbente negro;

25 D.) Un diseño de barra gris que esté optimizado para el valor de barra diana y no esté sobrediseñado en un 20% o más, tendrá menos riesgo de causar fallos de combustible en el reactor relacionados con la interacción entre las pastillas y el encamisado, debido a un menor "incremento de potencia" en las barras de combustible, y finalmente puede llevar a menos radioactividad en el refrigerante del reactor;

E.) La elevada densidad de material del tungsteno puede permitir diseños de barras grises con un mayor peso que tengan menos posibilidades de experimentar situaciones de inserción incompleta de las barras; y

30 F.) La muy elevada temperatura de fusión del tungsteno puede llevar a una mejor supervivencia a los accidentes, así como a menores limitaciones de diseño debidas a consideraciones térmicas.

El tubo de soporte interior para su uso en la presente invención puede incluir un material estructural que tenga una anterior experiencia en la industria nuclear y sea conocido por no producir consecuencias adversas si queda expuesto al refrigerante del reactor. El tubo de soporte puede ser un metal con unas buenas características de resistencia mecánica y de conductividad térmica en las condiciones operativas esperadas. La temperatura de servicio permitida deberá ser lo suficientemente elevada como para soportar la integridad continuada en el entorno cercano al material absorbente. En la realización en la cual se selecciona el material para optimizar la capacidad total de absorción de neutrones y obtener un peso diana para el conjunto de barras grises, también es deseable un material con una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 2 a 6 barnios, y una densidad de 7 a 9 g/cm³. El tubo de soporte interior puede estar taponado en ambos extremos para proporcionar el aislamiento del absorbente de neutrones primario en caso de una rotura del encamisado externo. Algunos materiales adecuados para su uso como tubo de soporte interior incluyen los siguientes:

A.) Aleaciones con base de níquel, incluyendo pero sin estar limitadas a, Alloy 718 (UNS N07718) y Alloy 625 (UNS N06625);

B.) Aceros inoxidables, incluyendo pero sin estar limitados a, SS-304L y SS-316L;

45 C.) Aleaciones con base de zirconio; y

D.) Metal de aluminio.

Las aleaciones con base de zirconio y el metal de aluminio no se utilizan típicamente en la realización en la cual se depende del material del tubo de soporte para optimizar la capacidad total de absorción de neutrones y obtener un peso diana para el conjunto de barras grises.

El uso de los materiales descritos en el presente documento para el tubo de soporte interior puede producir al menos uno de los siguientes beneficios:

5 A.) Las características de sección eficaz y densidad del material del tubo de soporte pueden otorgar al diseñador otro grado de libertad, que permita el desarrollo de un diseño de varillas grises que optimice simultáneamente el valor de la reactividad, el peso de las barras, y las características de transferencia térmica;

10 B.) El tubo de soporte interior puede aumentar la transferencia de calor hacia el exterior del absorbente de neutrones primario mediante el relleno de gran parte del huelgo interior entre el absorbente y el encamisado exterior con un material de elevada conductividad térmica, disminuyendo así efectivamente las temperaturas operativas del absorbente;

15 C.) El tubo de soporte interior puede proporcionar una segunda barrera entre el refrigerante del reactor y el absorbente de neutrones primario, adicionalmente al encamisado exterior, proporcionando la barrera adicional un nivel más elevado de seguridad de que el absorbente no entrará eventualmente en contacto con el refrigerante, lo que puede llevar a una mayor flexibilidad en el tipo de materiales que pueden considerarse finalmente para el absorbente primario; y

D.) El tubo de soporte interior puede minimizar la potencial redistribución del material absorbente de neutrones primario en caso de fragilización del absorbente.

20 Aunque se han descrito en detalle realizaciones específicas de la invención, los expertos en la técnica apreciarán que a la vista de las enseñanzas generales de la divulgación pueden desarrollarse diversas modificaciones y alternativas a dichos detalles. Por consiguiente, las disposiciones particulares dadas a conocer pretenden ser únicamente ilustrativas y no limitantes del alcance de la invención, que está definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

- 1.- Una barra gris (34) para un conjunto (36) de barras de control de un reactor nuclear, comprendiendo dicha barra gris:
- 5 un elemento tubular alargado (48) con un primer extremo (40), un segundo extremo (42), un diámetro exterior (50) y una longitud (52),
- un absorbente (110) de neutrones dispuesto dentro de dicho elemento tubular alargado (48) generalmente hacia el primer extremo (40) del mismo, comprendiendo dicho absorbente (110) de neutrones un material absorbente con una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 10 a 30 barnios, y
- 10 estando seleccionado del grupo que consiste en tungsteno sustancialmente puro de densidad teórica o cercana a la misma; metal de tungsteno de densidad reducida o poroso; aleaciones con base de tungsteno tales como tungsteno-renio y tungsteno-níquel-hierro; compuestos con base de tungsteno tales como carburo de tungsteno; escandio, iterbio y manganeso sustancialmente puros; aleaciones con base de escandio, iterbio y manganeso, y compuestos con base de escandio, iterbio y manganeso,
- 15 **caracterizada porque** dicha barra gris comprende una estructura (58) de tubo de soporte para rodear dicho absorbente (110) de neutrones dentro de dicho elemento tubular alargado (48), en la cual dicho tubo (58) de soporte comprende un material seleccionado del grupo que consiste en zirconio y aleaciones con base de zirconio, aluminio y aleaciones con base de aluminio, aleaciones con base de níquel y acero inoxidable.
- 2.- La barra gris (34) de la reivindicación 1, en la cual el absorbente (110) de neutrones es tungsteno sustancialmente puro.
- 20 3.- La barra gris (34) de cualquiera de las reivindicaciones 1 ó 2, en la cual dicho material absorbente (110) está dispuesto en una forma geométrica cilíndrica.
- 4.- La barra gris (34) de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la cual el absorbente (110) de neutrones tiene una densidad de material de 16,5 a 19,4 g/cm³.
- 25 5.- La barra gris (34) de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la cual el absorbente (110) de neutrones tiene una curva de valor de agotamiento sustancialmente plana ante una exposición prolongada a la irradiación de neutrones.
- 6.- La barra gris (34) de la reivindicación 1, en la cual el material del tubo (58) de soporte se selecciona para aumentar la absorción de neutrones del absorbente (110) de neutrones, tal como aleaciones de metal con base de níquel y acero inoxidable.
- 30 7.- La barra gris (34) de la reivindicación 6, en la cual el material del tubo (58) de soporte tiene una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s menor que el absorbente (110) de neutrones.
- 8.- La barra gris (34) de las reivindicaciones 6 ó 7, en la cual el material del tubo (58) de soporte tiene una sección eficaz microscópica de captura y absorción de neutrones a 2200 m/s de 2 a 6 barnios.
- 35 9.- La barra gris (34) de cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en la cual el material del tubo (58) de soporte tiene una densidad de 7 a 9 g/cm³.
- 10.- Un conjunto (36) de barras grises de control avanzado para un reactor nuclear, comprendiendo dicho conjunto (36) de barras grises de control avanzado una pluralidad de barras grises (34) según lo reivindicado en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.
- 40 11.- El conjunto (36) de barras grises de control avanzado de la reivindicación 10, en el cual dicha pluralidad de barras grises (34) comprende 24 varillas grises (34); y en el cual dicho absorbente (110) de neutrones está distribuido generalmente por igual entre todas las 24 barras grises (34).
- 12.- Un reactor nuclear que tiene un conjunto (36) de barras grises de control avanzado según lo reivindicado en las reivindicaciones 10 ó 11.
- 45

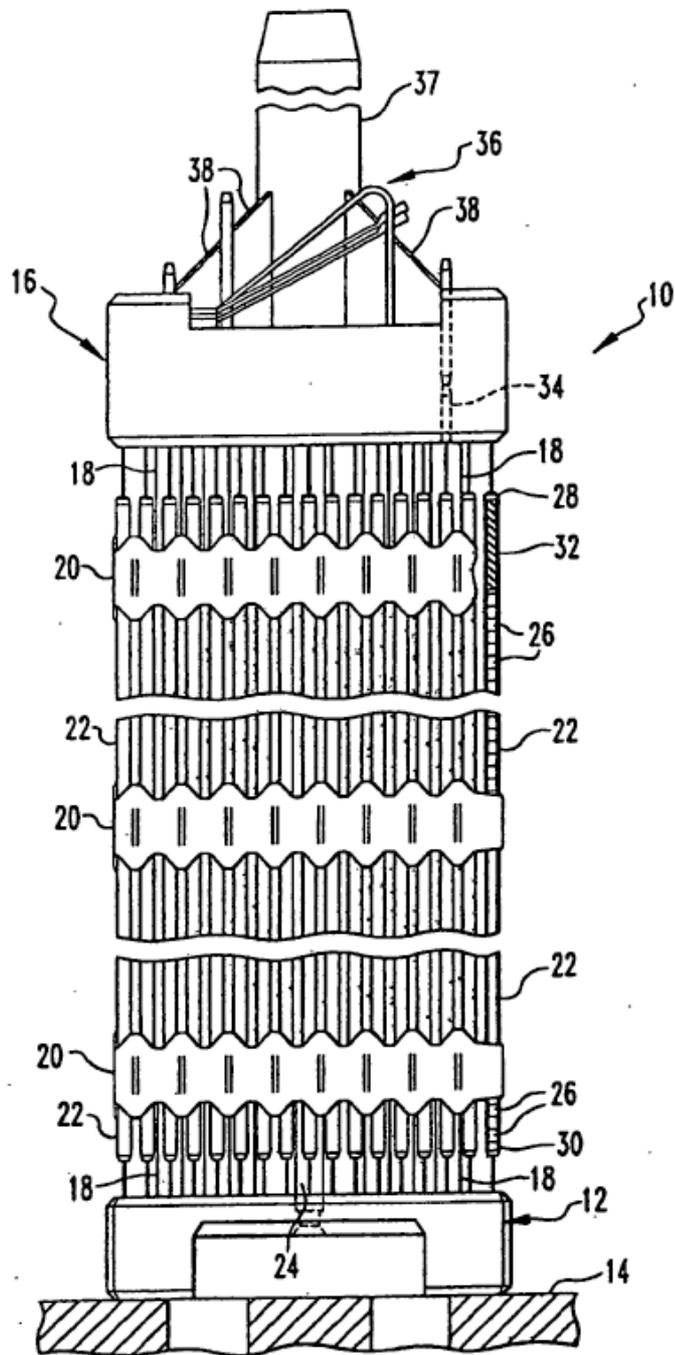


FIG. 1

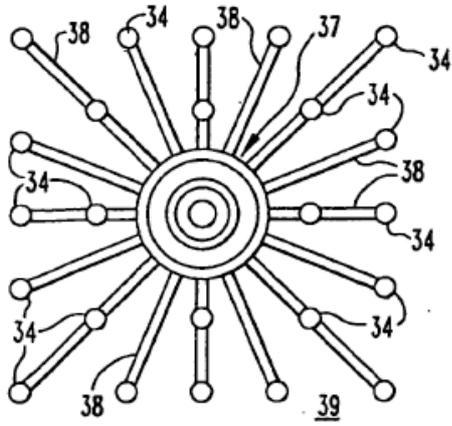


FIG. 2B

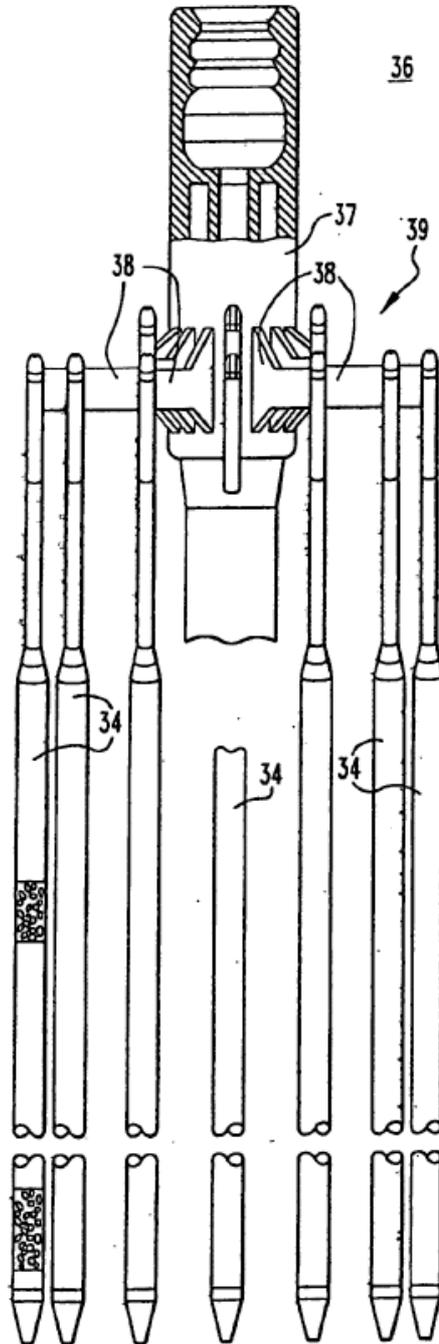
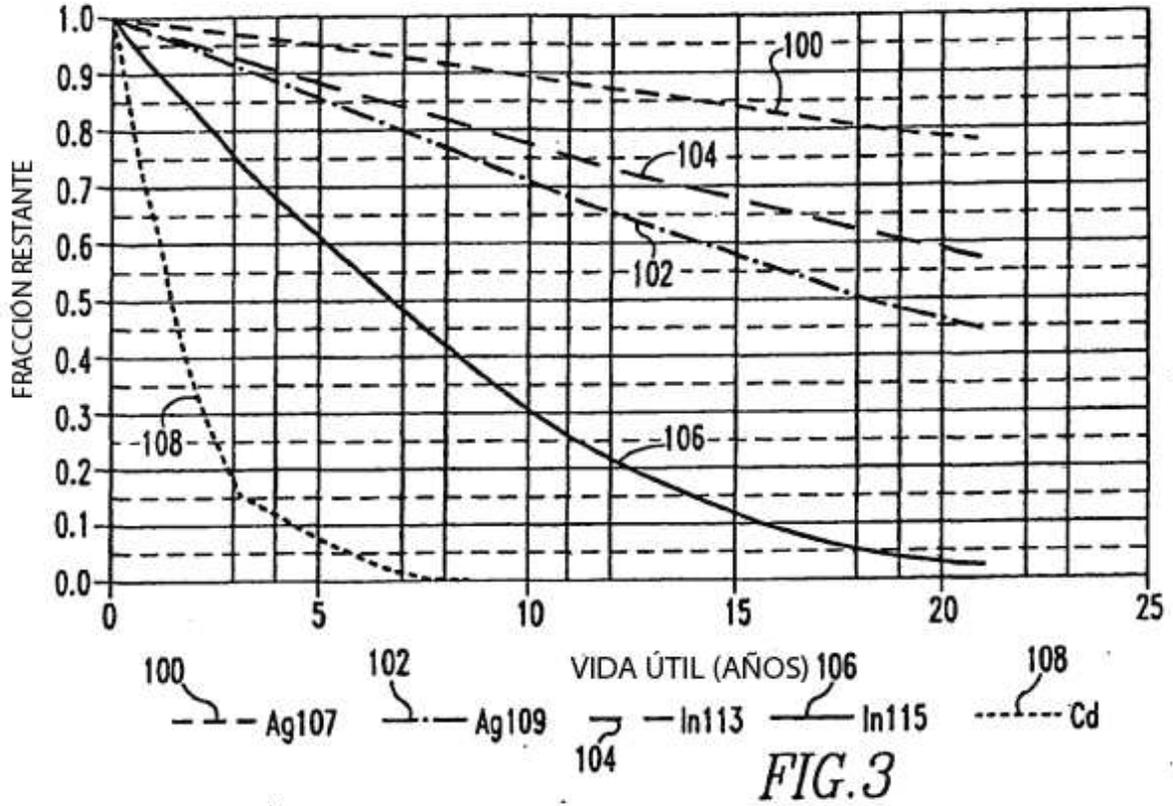
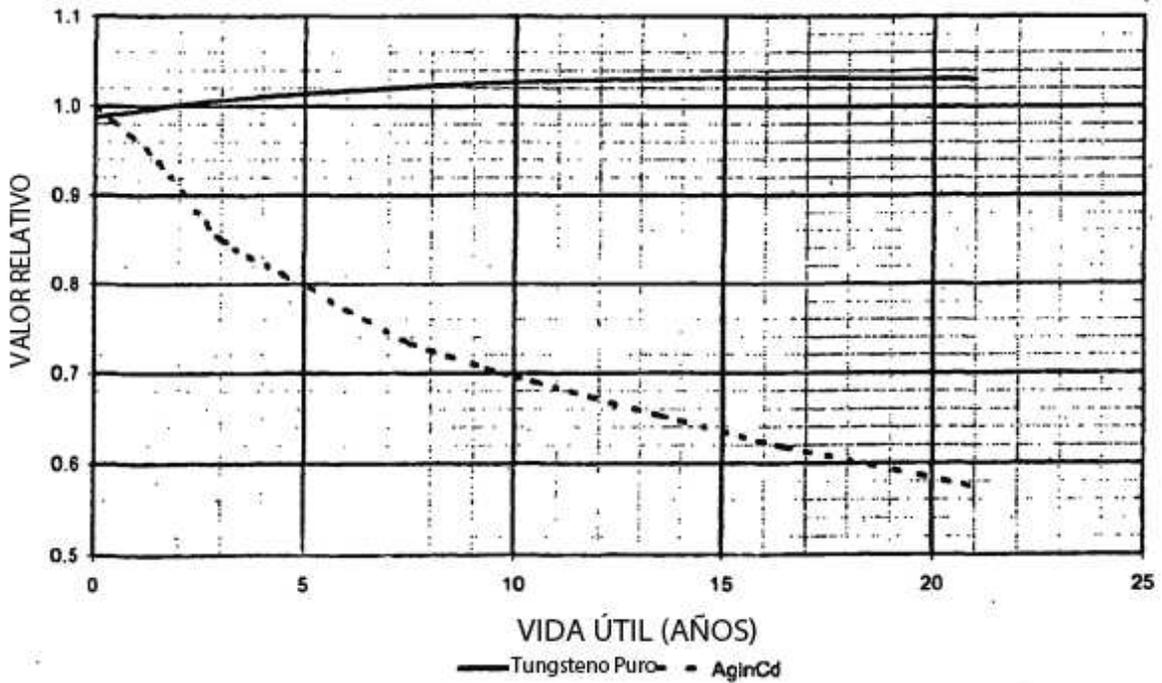
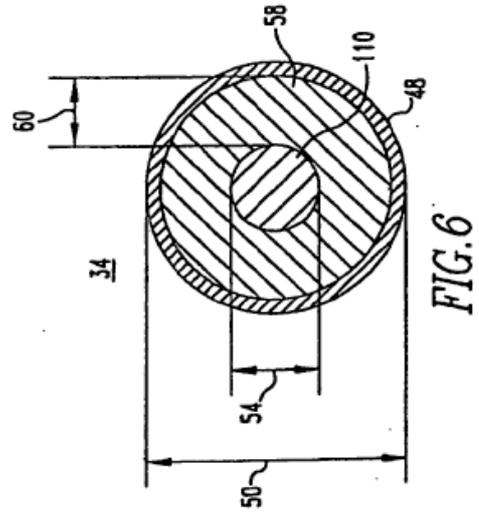
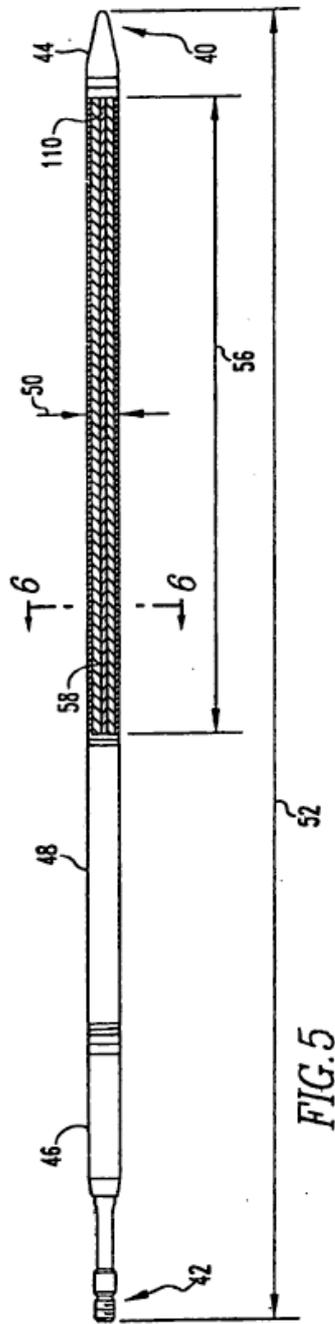


FIG. 2A



Tasas de Agotamiento Relativo de las Barras Grises





PORCENTAJE DE CAMBIO DE POTENCIA DE BARRA - GRCA ACTUAL

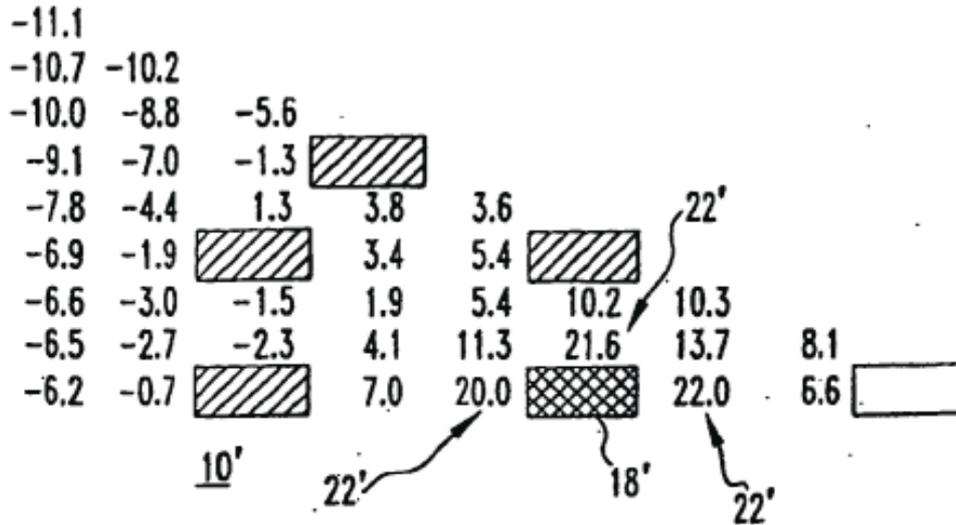


FIG. 7

Porcentaje de Cambio de Potencia de Barra (Todas las Barras Extraídas/Barras Insertadas) - GRCA Tungsteno Mejorado

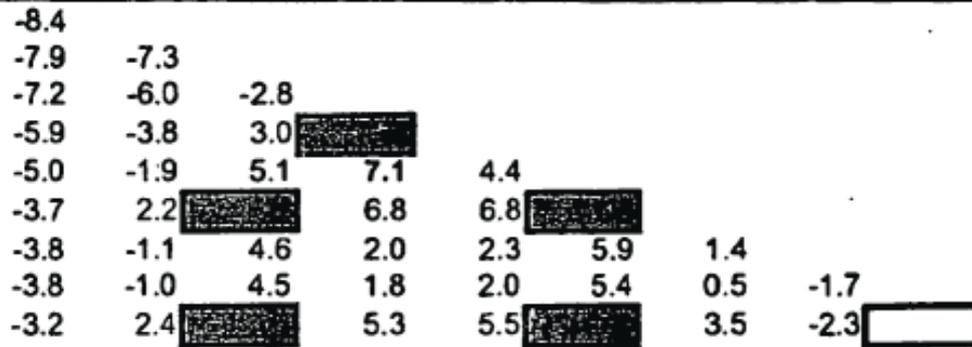


FIG. 8